



ZASTOSOWANIE STATYSTYCZNYCH TECHNIK OBLICZENIOWYCH SPC I DOE DLA POPRAWY PROCESÓW PRODUKCYJNYCH GRUPY ABB

Piotr Gawęd, Piotr Ciechanowski, ABB Sp. z o.o. Corporate Research

Wstęp

W procesach produkcyjnych zaangażowane są bardzo często skomplikowane i złożone technologie, w których należy kontrolować wiele parametrów, aby osiągnąć pożądaną efekt w postaci jakościowego produktu oraz wydajnego procesu. Dlatego też istnieje potrzeba stosowania w sposób systematyczny nowoczesnych narzędzi jakościowych w procesie wytwarzania (Six Sigma, Planowanie Eksperymentu, Statystyczne Sterowanie Jakością itp.).

W Centrum Badawczym ABB w Krakowie jakość w wytwarzaniu stanowi jedną z wielu gałęzi działalności. Stosowane przez nas podejście rozwiązywania problemów jakościowych (Six Sigma) bazuje na wykorzystywaniu zaawansowanych narzędzi statystycznych w celu poprawy zarówno końcowej jakości produktu, jak również zwiększenia wydolności procesów produkcyjnych, a co za tym idzie zmniejszenia kosztów złej jakości, które są nieodzownie związane z procesami wytwarzania.

Redukcje kosztów złej jakości (COPQ - *Cost of Poor Quality*) można osiągnąć poprzez zmniejszenie zmienności procesów produkcyjnych. Poprzez monitorowanie i analizowanie zmian krytycznych parametrów procesów produkcyjnych w czasie ustalamy aktualną zmienność parametrów (*baseline*). Rzeczywistą redukcję zmienności parametrów, jak również procesów produkcyjnych można osiągnąć przez zastosowanie nowoczesnych metod i technik jakościowych, takich jak Planowanie Eksperymentu (DOE - *Design of Experiment*).

Wszystkie zmiany w procesach wytwarzania mogą być efektywnie śledzone w czasie rzeczywistym przy użyciu komputerowych systemów SPC (ang. *Statistical Process Control*). Natychmiastowa analiza zmienności procesu na bazie kart kontrolnych pozwala wykryć obecność tak zwanych „specjalnych” przyczyn zmienności i pozwala operatorom, brygadzystom zapoczątkować działania w celu zidentyfikowania przyczyn. Ponadto po wprowadzeniu zmian w procesie w celu rozwiązania problemu system SPC może również zweryfikować skuteczność podjętych działań.



W pracy przedstawiono przykłady zastosowania narzędzi statystycznych, takich jak SPC oraz DOE do poprawy jakości procesu produkcji kabli wysokiego napięcia (SPC) oraz silników niskiego napięcia (DOE) w Grupie ABB.

Statystyczne Sterowanie Jakością (SPC)

Zmienność procesu (idea SPC)

Pierwszym etapem mającym na celu poprawę jakości procesów jest określenie ich aktualnej zmienności. Ponieważ żaden proces nie przebiega w warunkach idealnych, tzn. nie jest odizolowany od zewnętrznych zakłóceń, nigdy nie udaje się uzyskać dwóch identycznych wyników pomiarów. Innymi słowy, nie da się np. wyprodukować dwóch wyrobów o identycznych wartościach swoich cech. Jako skutek obecności różnego rodzaju zakłóceń rozróżnia się tzw. zmienność naturalną (powodowaną przez tzw. zakłócenia losowe) oraz zmienność specjalną (powodowaną przez tzw. zakłócenia specjalne). Wyznaczenie aktualnej zmienności procesu polega na wykonaniu pomiarów wielkości wyjściowych dla kolejnych próbek, a następnie określeniu granic, w których powinien mieścić się proces w przypadku, gdy oddziałują na niego jedynie zakłócenia losowe. Dzięki określeniu „naturalnego” zachowania się procesu (znając granice losowej zmienności procesu) można rozpocząć prace nad likwidowaniem (bądź też minimalizacją) wpływających na niego zakłóceń specjalnych. Do wyeliminowania wpływu zakłóceń specjalnych potrzebne jest zastosowanie metody, która pozwoliłaby je właściwie zidentyfikować. Pomocne w tym jest podstawowe narzędzie SPC, tzw. karta kontrolna. Natychmiastowa analiza zmienności procesu przeprowadzona na bazie kart kontrolnych pozwala wykryć obecność specjalnych przyczyn zmienności oraz zapoczątkować działania w celu zidentyfikowania źródeł tych przyczyn. Po wprowadzeniu zmian w procesie karty kontrolne mogą również zweryfikować skuteczność podjętych działań. [1]

W niniejszej części artykułu omówiono system SPC opracowany dla linii produkcji kabli wysokiego napięcia, zainstalowany w jednej z fabryk ABB.

Karty kontrolne

Karta kontrolna [2] w swojej najprostszej postaci przedstawia dwa wykresy, które odzwierciedlają zachowanie się monitorowanego parametru. Na jej podstawie możemy ocenić, czy przebiega on prawidłowo czy też może zakłócony zakłóceniami specjalnymi wymaga naszej ingerencji. Na wykresie tym zawsze znajdują się cztery podstawowe linie: górna i dolna granica kontrolna, linia centralna oraz przebieg mierzonej cechy (parametru). Linia centralna przedstawia wartość średnią ze wszystkich umieszczonych na karcie kontrolnej wyników. Granice kontrolne – wyznaczane na podstawie odchylenia standardowego całego procesu – pokazują obszar, w jakim powinny się mieścić wartości obserwowanych charakterystyk dla ustabilizowanego i poprawnie przebiegającego procesu. Poszczególne punkty to albo bezpośrednio zmierzone wartości pojedynczych wyników pomiarów, albo też wartości średnie otrzymane z wieloelementowych próbek. W opracowanym komputerowym systemie SPC dla linii produkcyjnej przewodnika zastosowano



kartę kontrolną typu IX – MR Na karcie tego typu monitoruje się miarę położenia oraz miarę zmienności (rozproszenia). Miarą położenia są pojedyncze pomiary wybranej właściwości produktu (karta IX, indywidualne X). Miarą zmienności są tzw. ruchome rozstępy (karta MR, ang. *Moving Range*). W systemie SPC dla linii ekstruzji (produkcja izolacji) zastosowano kartę kontrolną typu: X-średnie – S (odchylenie standardowe). Na karcie tego typu monitoruje się wartości średnie w poszczególnych próbkach oraz miarę rozproszenia poprzez przedstawienie wartości odchylenia standardowego w pobieranych próbkach.

Ponieważ produkcja kabli jest procesem ciągłym, próbki w omawianym systemie SPC to kolejne (najrzadziej co 2 metry) odczyty parametrów linii i produktu.

Proces produkcji kabli wysokiego napięcia

Przewodnik kabla wysokiego napięcia (rys. 1) powstaje w procesie skręcania, z odpowiednim skokiem, drutu (aluminiowego lub miedzianego). Proces ten realizowany jest z zastosowaniem koszy obrotowych, jak na rys. 2. Podstawowymi parametrami jakości przewodnika są tu: jego średnica, owalność, skok splotu oraz rezystancja.



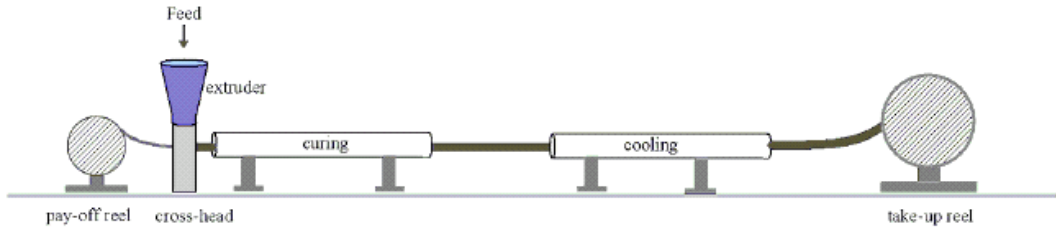
Rys. 1. Kable wysokiego napięcia



Rys. 2. Produkcja przewodnika

Kolejnym etapem produkcji jest powlekanie przewodnika izolacją. W przypadku omawianej linii z zainstalowanym systemem SPC warstwa izolacyjna ekstrudowana jest usieciowionym polietylenem (XLPE). Po nałożeniu warstw izolacyjnych przez ekstrudery przewodnik przesuwany jest wzdłuż sekcji utwardzania (*curing*, rys. 3) do sekcji schładzania (*cooling*, rys. 3). Tu również podstawowymi parametrami jakości są: grubości warstw izolacji (pomiar promieniami Rentgena) oraz owalność kabla, mierzony jest stopień usieciowienia XLPE oraz przeprowadzany jest test izolacji na przebicie elektryczne.

Jednym z ostatnich etapów produkcji (nie objętej systemem SPC) jest wzmocnienie zewnętrzną warstwą ochronną.



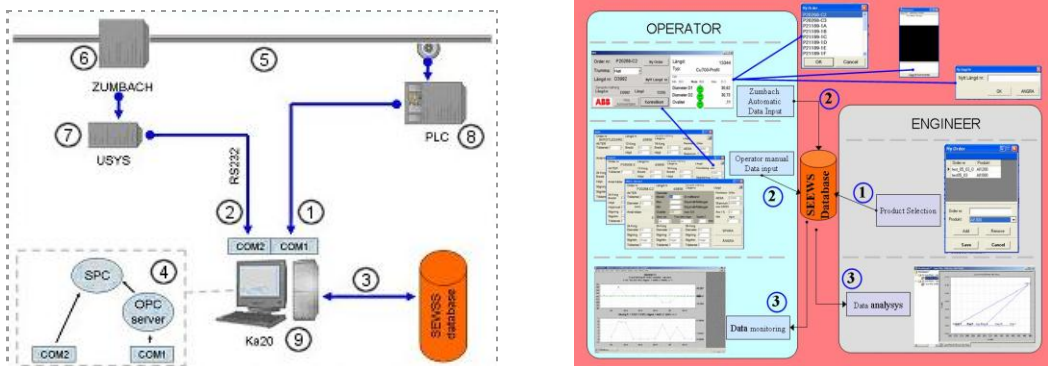
Rys. 3. Schemat linii ekstruzji

Konfiguracja systemu SPC

System SPC zainstalowany został na linii produkcji przewodnika oraz na linii ekstruzji. System oparty jest na aplikacji *SEWSS* firmy StatSoft. Dane są monitorowane i analizowane z wykorzystaniem środowiska *SEWSS/STATISTICA*.

Konfiguracja systemu dla linii przewodnika przedstawiona jest na rys. 4. Dane wczytywane są do bazy *SEWSS* automatycznie, z systemu automatyki (8) poprzez OPC server i z głowicy pomiarowej (6, 7) oraz ręcznie poprzez dodatkowy interfejs operatora (4), opracowany dla potrzeb systemu. Jedną z funkcji interfejsu operatora jest monitorowanie wydolności procesu C_p i C_{pk} ze względu na wymiary przekroju gotowego przewodnika. Ręcznie, poprzez interfejs, dla w kolejnych etapów skręcania wprowadzane są wartości dotyczące skoku skręcanych drutów, rezystancji przewodnika, średnic przewodnika.

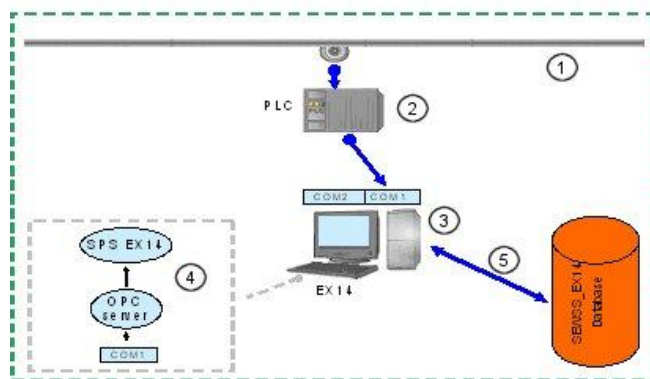
Kluczowe parametry wczytywane automatycznie to: liniowe i obrotowe prędkości linii produkcyjnej oraz końcowe wymiary przekroju przewodnika (6). Baza danych *SEWSS* została wzbogacona o dodatkową tablicę zawierającą wartości specyfikacji powiązanych z poszczególnymi typami przewodników.



Rys. 4. Konfiguracja systemu SPC dla linii produkcji przewodnika

Konfigurację systemu SPC dla linii ekstruzji (1) przedstawia rys. 5. Ze względu na dużą ilość zbieranych danych (proces ciągły, duża ilość parametrów dostępnych z systemu sterowania) zdecydowano się na zastosowanie kart kontrolnych typu X-średnie – S.

Dlatego też opracowano aplikację nazwaną SPS EX14 (4), pobierającą dane z systemu sterowania (2) i zapisującą w bazie SEWSS (5) z określoną częstotliwością wartości średnich oraz odchyłeń standardowych. Takie rozwiązanie, pozwalające na wybranie optymalnego kroku czasowego odczytów (z systemu sterowania linii) i zapisów (do bazy SEWSS), zapewnia zachowanie jakości zapisywanej informacji z jednoczesnym minimalizowaniem ilości miejsca zajmowanego przez bazę SEWSS (5). Kluczowymi parametrami konfrontowanymi ze specyfikacją są: grubości poszczególnych warstw izolacji, jak również owalność izolacji.



Rys. 5. Konfiguracja systemu SPC dla linii ekstruzji

W systemie zdefiniowano dwie podstawowe grupy użytkowników: *Operator* oraz *Engineer*. Operatorzy na bieżąco monitorują zdolność procesu (przewodnik) oraz poprzez monitory SEWSS wymiary przekroju przewodnika i izolacji. W przypadku wykrycia zmienności specjalnej (lub przekroczenia wartości specyfikacji) zobowiązani są do podjęcia odpowiednich kroków. Grupa *Engineers* analizuje dane historyczne, porównując wiele zamówień dla jednego typu kabla lub pojedyncze zamówienia, poszukuje przyczyny ewentualnych niezgodności [3].

Statystyczne sterowanie jakością - podsumowanie

Pierwsze analizy danych zebranych przez zainstalowany system SPC przewodnika wykazały istotność takich parametrów jak: prędkość (liniowa) oraz prędkości obrotowe poszczególnych koszy nawijających drut. Właściwy stosunek tych prędkości utrzymywany jest przez system automatyki, jednakże skomplikowanie warunków produkcyjnych powoduje niekiedy zakłócenia specjalne. Zmiany prędkości wpływają na długość skoku skręcanych drutów, co z kolei odwrotnie proporcjonalnie wpływa na średnice przekroju przewodnika. Zmiana przekroju przewodnika nie pozostaje oczywiście bez wpływu na jego rezystancję.

System SPC dla linii ekstruzji pozostaje obecnie na etapie implementacji. Dotychczasowe analizy posiadanych danych wskazują na istotność stabilności ciśnienia ekstrudowanego tworzywa. Planowana jest więc analiza przyczyn zmienności ciśnienia, jak również samo sprawdzenie zależności zmienności średnicy izolacji kabla od zmienności ciśnienia ekstruzji. Wnikliwej analizie poddana zostanie zmienność takich parametrów, jak: położenie



kabla w rurze chłodzącej czy temperatury czynnika chłodzącego. Interpretacji poddane zostaną również dane zbierane podczas fazy rozruchu linii, jak również końca produkcji.

Wybranie systemu *SEWSS* spowodowane było głównie łatwością wykorzystania pakietu *STATISTICA* dla analiz przyczyn i monitorowania zmienności specjalnych. Nie bez znaczenia była również dostępność i łatwość konstruowania czytelnych monitorów oraz raportów.

Technika Planowania Eksperymentów

Coraz częściej na etapie projektowania nowego produktu, jak również podczas uruchamiania produkcji, wykorzystywane są nowoczesne metody wspomagania komputerowego. W czasie uruchamiania produkcji i jej optymalizacji zastosowanie znalazły zaawansowane metody statystyczne (planowanie eksperymentu – DOE, statystyczne sterowanie procesami – SPC itp.), które pozwalają poznać i ocenić wpływ parametrów procesu na końcową jakość produktu.

W niniejszej części artykułu przedstawiono i omówiono wyniki przeprowadzonego eksperymentu w procesie wysokociśnieniowego zalewania (HPDC – *High Pressure Die Casting*) miedzianych wirników do silników niskiego napięcia w jednej z fabryk ABB.

Celem przeprowadzonego eksperymentu było określenie wpływu (związku) parametrów wejściowych sterujących procesem zalewania na wybrane wielkości wyjściowe oraz znalezienie ich optymalnych wartości.

Charakterystyka obiektu badań (maszyna HPDC)

Wielkości wejściowe (parametry) oraz ich poziomy zmienności

Podstawowym zagadnieniem w trakcie opracowywania modelu obiektu badań jest właściwe dobranie zbioru wielkości wejściowych. Spośród wielu parametrów wybrano osiem, których wpływ na odpowiedzi układu (wyniki końcowe) wydawał się być najbardziej istotny:

- ◆ **Temperatura stopionej miedzi** (pod koniec etapu metalurgicznego) [°C];
Temperatura topnienia miedzi wynosi 1083 °C, jednakże zasięg temperatur używanych w procesach odlewania ciśnieniowego zmienia się od 1150 do 1290 °C.
- ◆ **Ilość magnezu** dodawana do miedzi podczas fazy odtleniania [%];
- ◆ **Powierzchnia układu wlewowego** [%];
W eksperymencie zostały rozpatrzone dwa przypadki: w pierwszym wszystkie otwory układu wlewowego były otwarte (pełne otwarcie - 100%), w drugim przypadku jedynie 70 % powierzchni układu wlewowego pozostało otwarte.
- ◆ **Obrócenie otworów układu wlewowego** względem żłobków wirnika [%];
Zostały rozpatrzone również dwa ustawienia otworów układu wlewowego względem żłobków wirnika: w pierwszym przypadku otwory układu wlewowego zostały



ustawione w jednej linii wraz ze żłobkami wirnika, w drugim zaś zostały obrócone o kąt równy połowie odległości pomiędzy otworami.

- ◆ **Ciśnienie wystrzału** [bar];
- ◆ Objętość powietrza w cylindrze przed wystrzałem – **szczelina powietrzna** [mm];
- ◆ **Warstwa miedzi** pozostała w cylindrze po odlaniu wirnika [mm];
- ◆ **Temperatura form odlewniczych** (temperatura oleju sterująca temperaturą górnej i dolnej formy odlewniczej) [°C].

Wybrane parametry wraz z zakresami zmienności przedstawiono w tabeli 1. Ustalono również, że parametry te będą zmieniane na dwóch poziomach (tzn. każdy z parametrów przyjmuje dwie wartości, minimalną i maksymalną).

Tabela 1. Wielkości (parametry) wejściowe.

Nr	Parametry	Kod	min (-1)	punkt centralny (0)	max (+1)
1	Temperatura miedzi, [°C]	TM	1180	1235	1290
2	Ilość magnezu, [%]	IM	0.01	0.02	0.03
3	Powierzchnia układu wlewowego, [%]	PUW	70	85	100
4	Obrócenie układu wlewowego, [%]	OUW	0	50	100
5	Ciśnienie wystrzału, [bar]	CW	150	160	170
6	Szczelina powietrzna, [mm]	SP	20	40	60
7	Warstwa miedzi, [mm]	WM	40	65	90
8	Temperatura form odlewniczych, [°C]	TF	130	160	190

Odpowiedź układu (wielkość wynikowa)

Ostateczna jakość wirników jest rezultatem kombinacji wyjściowych parametrów z wielu etapów i podetapów procesu produkcji. Z punktu widzenia samego etapu odlewania jakość jest zazwyczaj opisana poprzez:

- ◆ współczynnik porowatości odlewów (stosunek ostatecznej wagi elementu do wagi teoretycznej),
- ◆ chropowatość powierzchni odlewu (zastosowanie tego parametru wydaje się jednak być mało przydatne w przypadku odlewów wirników).

Współczynnik porowatości podaje informacje na temat braku metalu w całym odlewie, jednak informacje na temat lokalizacji braków nie mogą być uzyskane przy jego pomocy. Jakość mikrostruktury odlewu może być pośrednio opisana przez całkowitą wagę miedzi wirnika po odlaniu, z tego też względu zdecydowano się przyjąć ten parametr (waga miedzi odlewu) jako wielkość wyjściową (odpowiedź układu).



Model badań eksperymentalnych (plan doświadczenia) oraz wyniki

Pełny eksperyment czynnikiowy dla tej ilości parametrów (8) wymagałby 256 doświadczeń ($2^8 = 256$). Biorąc pod uwagę koszty przygotowania i przeprowadzenia tylu doświadczeń, zdecydowano się ograniczyć liczbę eksperymentów do 16. Ta liczba doświadczeń determinuje ułamkowy plan doświadczenia czynnikiowego ($2^{8-4} = 16$), wraz z trzema doświadczeniami w punkcie centralnym (tabela 2). Dodatkowe trzy doświadczenia miały na celu sprawdzenie (potwierdzenie lub zaprzeczenie) wcześniejszego założenia o liniowości badanego procesu. Takie ustawienie eksperymentu pozwoliło analizować jedynie wpływ głównych czynników, gdyż ta liczba doświadczeń powoduje wewnętrzne powiązania pomiędzy parametrami głównymi, interakcjami drugiego i trzeciego rzędu [4, 5].

Na tym etapie badań rozważany był tylko jeden wirnik o promieniu 420 mm i wysokości 600 mm. Nominalna (teoretyczna) waga miedzi dla tego typu wirnika wynosi 136 kg.

Wyniki badań odlewów zostały zamieszczone poniżej w tabeli 2. Zamiast rzeczywistych wartości kontrolowanych parametrów użyto zmiennych bezwymiarowych, gdzie „-1” oznacza minimalną wartość określonego parametru, a „+1” maksymalną („0” oznacza wartość w punkcie centralnym).

Tabela 2. Plan doświadczenia wraz z wynikami.

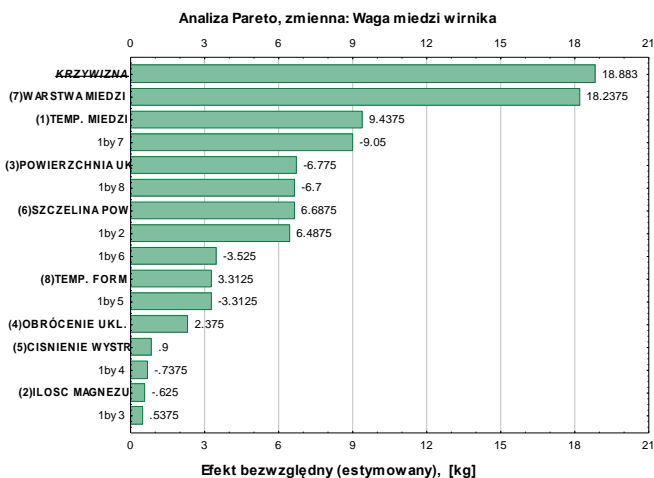
Nr	TM	IM	PUW	O UW	CW	SP	WM	TF	Waga miedzi wirnika [kg]
1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	124,45
2	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	124,60
3	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	114,35
4	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	82,95
5	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	103,75
6	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	95,85
7	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	123,15
8	1	1	1	1	1	1	1	1	123,60
9	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	90,05
10	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	122,40
11	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	124,20
12	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	123,55
13	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	124,75
14	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	124,45
15	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	117,60
16	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	119,90
17 (C)	0	0	0	0	0	0	0	0	124,10
18 (C)	0	0	0	0	0	0	0	0	124,50
19 (C)	0	0	0	0	0	0	0	0	124,65

Analiza statystyczna wyników eksperymentu

Analiza ułamkowego planu doświadczenia – sprawdzenie liniowości modelu

Standardową procedurą sprawdzenia liniowości modelu jest przeprowadzenie dodatkowych doświadczeń z ustawieniami kontrolowanych parametrów w środku zakresu ich zmienności (punkcie centralnym). Wyniki tych dodatkowych doświadczeń należy porównać z wynikami analizy ułamkowego planu doświadczenia czynnиковego. Efekt tego porównania został przedstawiony za pomocą wykresu Pareto (rys. 6). Widać, że „krzywizna” modelu jest istotna i nie może być zaniedbana, tak więc założenie o liniowości modelu nie jest prawdziwe. Analiza pokazuje, że największy wpływ na wartość wielkości wyjściowej (waga miedzi wirnika) mają następujące parametry: warstwa miedzi, temperatura miedzi, powierzchnia układu wlewowego oraz szczelina powietrzna.

Liczba punktów pomiarowych dostępna na tym etapie pracy (16 + 3) jest niewystarczająca dla dostarczenia nieliniowego modelu regresji w analizowanym obszarze zmienności parametrów.



Rys. 6. Wykres Pareto dla analizy modelu z punktem centralnym

Kompozycyjny plan doświadczenia drugiego rzędu

Chcąc opisać nieliniowe zachowanie modelu, należy dokonać zmian w poprzednim planie doświadczenia, w tym celu do dalszej analizy wybrano kompozycyjny plan doświadczenia drugiego rzędu [6]. Liczba punktów pomiarowych dla tego typu planu silnie zależy od liczby analizowanych parametrów. W celu zredukowania liczby dodatkowych odlewów zdecydowano się zmniejszyć liczbę kontrolowanych parametrów do trzech najważniejszych:

- ◆ Temperatura („T”) ciekłego metalu (miedzi),
- ◆ Szczelina („S”) powietrzna,
- ◆ Warstwa („W”) miedzi (pozostała w cylindrze po odlaniu wirnika).



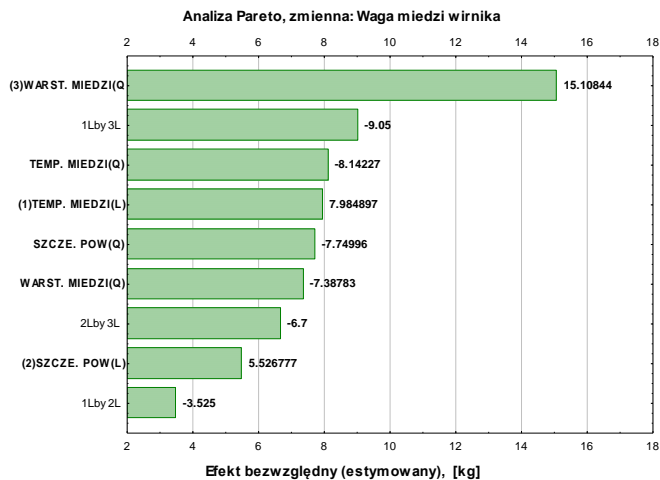
Rzędy od 20-25 w tabeli 3 są dodatkowymi doświadczeniami, które musiały być wykonane (tabela ta zawiera również wyniki dla tych doświadczeń). Parametry, których nie uwzględniono jako kontrolowane, zostały ustawione na swych centralnych wartościach.

Tabela 3. Zestawienie kombinacji parametrów dla dodatkowych sześciu doświadczeń.

Nr	TM	IM	PUW	OUW	CW	SP	WM	TF	Waga miedzi wirnika [kg]
20	-1.29	0	0	0	0	0	0	0	123.10
21	1.29	0	0	0	0	0	0	0	124.35
22	0	0	0	0	0	-1.29	0	0	124.10
23	0	0	0	0	0	1.29	0	0	124.00
24	0	0	0	0	0	0	-1.29	0	124.35
25	0	0	0	0	0	0	1.29	0	124.35

Analiza statystyczna została przeprowadzona przy użyciu wszystkich wyników eksperymentalnych (zarówno z ułamkowego planu czynnikowego, jak i z kompozycyjnego planu doświadczenia drugiego rzędu). Na rysunku 7 przedstawiono wpływ liniowych i kwadratowych efektów odpowiednich parametrów. Na podstawie tej analizy otrzymano następujące równanie regresji (równanie 1). Zakres zmienności wielkości wejściowych w równaniu 1 zmienił się od -1,29 do +1,29 (normowane jednostki).

$$\begin{aligned} \text{Waga Miedzi Wirnika} = & 127.38 + 3.99 \cdot T - 4.07 \cdot T^2 + 2.27 \cdot S - 3.87 \cdot S^2 + 7.55 \cdot W - \\ & - 3.69 \cdot W^2 - 1.76 \cdot T \cdot S - 4.52 \cdot T \cdot W - 3.35 \cdot S \cdot W \quad [kg] \end{aligned} \quad (1)$$



Rys. 7. Analiza Pareto efektów głównych i interakcji dla kompozycyjnego planu doświadczenia

Optymalne ustawienia parametrów wejściowych

Poszukiwanie maksymalnej wagi miedzi wirników dało optymalne ustawienia przedstawione w tabeli 4. Wynikiem tej analizy jest waga miedzi wirnika równa 132,57 kg, która w porównaniu do wartości nominalnej (136 kg) daje brak miedzi rzędu 3,43 kg (2,52%), i objętość porowatości miedzi około 0,39 dm³ (średnio w wirniku).

Tabela 4. Optymalne ustawienia parametrów wejściowych.

TM	IM	PUW	OUW	CW	SP	WM	TF	Waga miedzi wirnika [kg]
[°C]	[%]	[%]	[%]	[bar]	[mm]	[mm]	[°C]	[kg]
1235	0,02	100	50	160	40	90	160	132.57

Planowanie eksperymentów - podsumowanie

Statystyczna analiza przeprowadzonego eksperymentu, której celem było optymalne ustawienie parametrów maszyny wysokociśnieniowego odlewania wirników silników klatkowych dała wartości kontrolowanych parametrów, dla których możliwe jest produkowanie wirników typu 420x600 z porowatością poniżej 5 % (z prawdopodobieństwem na poziomie 95%). Z powodu ograniczonej liczby odlewów, które zostały wykonane (dla każdego układu planu tylko jedno doświadczenie zostało wykonane), nie można analizować ustawień maszyny pod względem zmniejszenia zmienności procesu produkcji. Pełna optymalizacja wymaga również tego typu analizy, tak więc przyszłe badania powinny wziąć pod uwagę co najmniej trzy powtórzenia dla każdego ustawień (dla każdego układu planu doświadczenia).

Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie statystycznych technik, takich jak planowanie eksperymentów (DOE) oraz statystyczne sterowanie jakością (SPC), pozwoliło na znaczne ograniczenie kosztów złej jakości (COPQ) na omówionych liniach produkcyjnych.

Wszechobecna presja zmniejszania kosztów produkcji pozwala przewidzieć znaczne zwiększenie zainteresowania tego typu technikami w firmach produkcyjnych Grupy ABB. Rosnąca potrzeba zastosowania narzędzi wspomagających zaawansowane techniki statystyczne będzie naturalną konsekwencją tego trendu.

Literatura

1. Montgomery D. C., Introduction to statistical quality control. New York 1997.
2. Greber T., Statystyczne sterowanie procesami – doskonalenie jakości z pakietem *STATISTICA*. Kraków 2000.
3. Ciach M., *KA20 conductor manufacturing line - SPC data analysis*, Technical Report TR 04-004, ABB Corporate Research Kraków 2004.



-
4. Jeff-Wu C.F., HAMADA M., *Experiments – Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization*. New York, John Willey & Sons, Inc., 2000.
 5. Montgomery D. C., *Design and Analysis of Experiments*. New York, John Willey & Sons, Inc., 1997.
 6. Myers R. H., Montgomery D. C., *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. New York, John Willey & Sons, Inc., 1995.